

ブレイン・デコーディングとブレイン・マシン・インターフェースを用いた心理学的研究についての論考

中沢 仁¹

Psychological study with brain decoding and brain-machine interface

Hitoshi Nakazawa

Abstract：ブレイン・マシン・インターフェース技術の開発に相まって進展したブレイン・デコーディングの技術は、マインド・リーディングとしての理解も可能であり、心的機能の解明に役立つ可能性を秘めている。このブレイン・デコーディングの方法について、現行の脳活動情報の測定技術による制約、デコーディングのモデル、心理学的基盤について原理的な考察を行った。また、ブレイン・デコーディングにブレイン・マシン・インターフェースの方法を組み合わせることによる、心的機能構築のシミュレーションの可能性について考察した。

Keywords：brain decoding, brain-machine interface, brain-computer interface

はじめに

「ヒトの心をのぞいてみたい」、単純な好奇心からにして、上手に事を運ぶためにしろ、これは誰しもが一度は考えてみることであろう。他人の心の中が見えれば対人的な行動の方法が劇的に変わるだろうし、仮に自分だけが他人の心の中を見ることができるとすれば、優位な立場に立つことになるのはまず間違いない。しかしながら、ヒトの心の中をのぞくことはいくまでもなく容易なことではない。ヒトは、日常的には顔の表情や仕草によって心の中を読み取ろうとし、学術的には皮膚電位変化などの生理的指標によってあるいは心理学的方法論に基づいた実験や調査の技法を駆使して心の中について科学的に客観的な判断を下そうとしてきた。そして近年、脳の状態を可視化する科学的技術が進歩したことによって、心象の可視化の新たな可能性が拓かれてきている。この技術の一つが、ブレイン・デコーディングである。本稿では、近年さまざまな形で達成されているブレイン・デコーディングと、既に実用化もされているブレイン・マシン・インターフェースという技術から、心の研究について考察してみたい。

ブレイン・デコーディング

ブレイン・デコーディングとは、脳の（神経的）活動状況に関する情報が、その脳活動の由来もしくは脳活動の意味に関する情報を信号化（コーディング）している

と考えて、それを解読（復号化、デコーディング）しようとする試みである。ブレイン・デコーディングを脳活動の由来のみをデコードするものとし、脳活動の意味（ひいては心的内容）をデコードするものを「マインド・リーディング」と呼ぶこともあるが、本稿では区別せずにどちらもブレイン・デコーディングと呼ぶことにする。脳における神経情報処理によって心的機能が実現されているとするのが21世紀現在の脳科学の考え方であるから、ブレイン・デコーディングは、心の中を覗く最先端の技法ということになるだろう。

基本的原理

まず、ブレイン・デコーディングの基本的な原理について整理する。ブレイン・デコーディングは、取得した脳活動という信号からそのときの心的課題を解読することと換言できる。ここでいう心的課題は、意識しているとしていないとにかかわらず、またその種類もレベルも多様な心的事象を実現するものとしておく。つまり、感覚・知覚、認知課題、情緒などありとあらゆる心的過程を含み、また、例えば認知課題でいえば、「計算課題」や「言語連想」という課題の種類であったり、計算課題の「乗算」という詳細なレベル、さらには「 5×3 」というより具体的なレベルのすべての階層に及ぶ記述を意味するものとする。当然のことながら、生体の脳は瞬間瞬間において同時にいくつもの心的課題をこなしている。従って、記録する脳活動に対して、解読すべき正解を定めなければならない。マインド・リーディングという事態を直感的に適用すれば、ヒトが心に思い浮かべたことを正解とし、心に思い浮かべているときに記録され

受稿日2011年12月1日 受理日2011年12月7日

1 専修大学人間科学部心理学科 (Department of Psychology, Senshu University)

た脳活動から心に思い浮かべた内容が導き出されれば、ブレイン・デコーディングが達成されたということになる。ブレイン・デコーディングの評価は、こうした成功、不成功が客観化されるような手続きをとればよい。

では、どうすればブレイン・デコーディングは実現するだろうか。最も単純な方法の可能性は、既知の脳活動信号と正解（デコードすべき内容）のペアに対して、未知の脳活動信号を比較対照し、脳活動信号が合致したときにその対照コードによってデコードを行うというもので、いわば暗号解読表による解読である。しかしながら、これは必要十分な信号のみを取得できるときに限って適用可能な方法である。一般には、取得する信号にはデコードのためには不要であるノイズが含まれることになると考えるべきである。なぜなら、脳はわれわれが注目しようとしているデコードすべき心的事象以外にも多数の課題を同時にこなしているはずで、記録した信号にはそれらの課題によるコードが含まれてしまっているはずだからである。従って、記録したままの脳活動信号ではコードとデコードすべき内容との対照表を作ることはできないし、また、この表が与えられているとしても、ノイズを除去しない限りは信号としてデコードに用いることができない。デコードを可能にするためには必要十分な情報がどこに存在しているかを定めなければならないという堂々巡りの状況にあるのだ。

単純な方法論が存在していない以上、ブレイン・デコーディングの実現は、導くべき正解の特定、正解を導く方法の確立、正解を導くことが可能になったことの評価、という三つのステップを経てなされなければならない。具体的に記述すれば以下ようになる。

ステップ1 コード定義

脳活動信号の取得と、それに対照させるデコードすべき内容の特定

ステップ2 デコーダ構築

デコードすべき内容を脳活動信号から推定する方法の確立

ステップ3 デコーダ評価

脳活動信号からデコードできることの確認

理論的問題を考える前に、ブレイン・デコーディングの具体的な実現例を紹介しておく。Kamitani and Tong (2005) は、機能的磁気共鳴画像 (functional Magnetic Resonance Imaging; fMRI) を用いて、さまざまな傾きの縞模様を視覚刺激として与えたときの脳神経活動信号を記録し、信号から視覚刺激をデコードすることができ

ることを示した。ステップ1としては、ある方位の縞模様パターンを視覚刺激として与え、その視覚情報処理が行われている際の脳神経活動信号を fMRI によって記録し、縞模様の方角角度をデコードすべき内容として、その信号のカテゴリカルなラベルとした。ステップ2では、記録したいくつかの信号から、その信号のラベルを予測する数学的なモデル (統計的モデル) を、サポート・ベクター・マシン (Support Vector Machine; SVM) (Cortes and Vapnik (1995)) を用いて構築した。サポート・ベクター・マシンとは、データを基にプログラム自体が学習する機械学習アルゴリズムである。これによつては、ラベル推定のための情報が明示的に抽出されることはないが、学習が完了し成立すれば、信号からラベル推定を行うことのできる「デコーダ」がプログラムとして構築されることになる。ステップ3としては、ステップ2での学習に用いていない、ただし、既にラベルづけがなされている脳神経活動信号によって、ステップ2で作成した「デコーダ」が正しいデコードを行うことが可能であることをテストして確認した。実験の効率的な実施における観点から、ステップ1で記録した信号を二分し、一方をステップ2の学習用に、他方をステップ3のテスト用に用いている。

Kamitani and Tong (2005) による上述の部分のブレイン・デコーディングは、神谷 (2007) が指摘するとおり、知覚像そのものの推定ではなく、視覚刺激の推定でしかない。しかしながら、縞模様の方向の知覚は、幾何学的錯視等の要因によって刺激の物理的な状態から若干のずれが生じることがあり得るとしても、ほぼ一意に知覚像が形成されるという意味で、刺激と知覚像との双対性が推定されるものであることから、このブレイン・デコーディングの結果は知覚像への拡張的理解を許容するだろう。実際、Kamitani and Tong (2005) でも、上述のデコーダによって、「注意を向けている縞模様の傾き」という「より主観的な状態」の心的事象についての推定も可能であることを示している。

ステップ1 コード定義

それでは、ブレイン・デコーディングについて、先にあげたそれぞれのステップ毎に考察していくことにする。まずステップ1のコード定義における、脳活動信号の取得についてである。現在、脳活動の信号を取得するためのさまざまな方法が開発されている。しかし、先に述べたように、神経細胞のレベルに対応できる十分な時空間的解像度を実現している方法は未だない。また信号

記録のための装置の制約から、身体的動作も制限されることがある。特にfMRIでの記録のためには、大がかりな装置内で脳を固定することが今のところは必要である。また、一般的なfMRIの解像度（分解能）は、空間で数mmのオーダー、時間で数秒のオーダーである。当然これは、個々の神経細胞の大きさ（0.01~0.1mm）と時間的変化（数msec）に比してはるかに大きい。しかしながら、この解像度の信号であってもデコードが可能であったということは重要である。おそらく、真の情報が高解像度に対応する領域（高周波数帯）に存在していないというわけではなく、低い解像度の技術であっても高周波数帯に存在している情報の抽出がある程度可能であるということであろう。Kamitani and Tong (2005)の場合は、特に静止画像刺激であることから、時間解像度をほぼ無視できて、空間解像度の問題に帰着され、異なる脳の空間位置における信号によって重畳されていた情報を分離抽出できたと考えるのが妥当だと考えられる（神谷，2007）。ともかくも、低解像度の信号情報の取得は、科学技術の進歩を待たずに今でも可能であり、そのデータ容量も小さくて済む。大容量のデータは、ステップ2での新たな問題を生じさせることになるが、それについては後述する。

デコードすべき内容についてはどうだろうか。Kamitani and Tong (2005)は、「見ている」知覚的刺激と「注意を向けている」知覚的刺激とを推定した。後者は確かに主観の状態としての意味合いが強まっているが、いずれにしろ視覚刺激を記述するカテゴリーカルなラベルだということには違いない。Miyawaki et al. (2008)では、カテゴリー的なデコードではなく、アナログ画像的なデコードも可能であることも示されている。つまり、見ている画像を神経信号から復元することに成功したのである。しかしながら、厳密に考えると、脳活動の根本的由来であるところの刺激をデコードしたのか、知覚的画像情報処理による中途状態をデコードしたのか、あるいは知覚過程の結果であるところの知覚像そのものをデコードしたのかは判然としない。マインド・リーディングの観点での（主観的）心的事象のデコードと、単純な外界への反応に過ぎない神経活動からの外界に関する推定とは、混同されるべきではない。とはいえ、視覚的心像に関しては、刺激とのずれも含めて視覚化が実現できる可能性が示されたことになり、この意義は大きい。

視覚以外の感覚モダリティにおける知覚像や、情動的な心的事象についてはどうなるだろうか。アナログのデコードを実現しようとしても、聴覚以外は装置的に難し

い。当面、デコードすべき内容を言語的に記述し、カテゴリーカルなデコードによる研究を進めていく必要があるのだろう。やがては、心的事象においては、質的な側面だけではなく、当然量的な側面にもアプローチしなければならない。量は記述すること自体は単純であるが、デコードすべきものとして脳活動情報と対応させるためには、心理学的測定の原理に基づいて妥当なものとなっていなければならない。

情動を扱おうとすると、さらに新たな問題が生じる。情動のデコードのためには、その情動状態を作り上げている（と考えられる）脳活動信号を記録する必要がある。つまり、実験の際に協力者は「怒っている」「悲しんでいる」といった状態に何度も到達させられて、その都度神経信号を記録される、あるいは、その状態を維持させられて神経信号を記録し続けられるということとなる。このような実験状況は、現在のところはとても現実的なものとは思えない。電子機器的技術の進歩だけでは越えられない心理学的技術の進歩（といえるかどうかは定かではないが）も必要とされることがわかる。

ステップ2 デコーダ構築

次に、ステップ2のデコーダ構築について考える。デコードが可能であるためには、脳の領域の全体にしろ局所にしろ、特定の心的事象と脳活動状態が1対1もしくは1対多の対応関係にあることが必要である。「おばあちゃん細胞」あるいは「黄色いフォルクスワーゲン細胞」的な、心的事象をコードする単一細胞が存在するならば、その単一細胞の信号を取得することができればデコードが可能となることは自明である。そうした単一細胞が存在しない場合は、デコードが可能である限りは、心的事象は複数からなる細胞群の活動状態の関数として表現できることになるから、これらによる信号を取得すればよい。ここでの関数表現が可能であるという表現は、脳神経活動信号から心的事象のデコードが可能であることの論理的言い換えに過ぎず、脳と心的事象との因果関係を含意するものではないので留意していただきたい。この信号は多次元のデータ構造として解釈できる。取得した信号は、ノイズを含んでいたり、情報の置換や欠落が起こっていると考えなければならない。真の脳活動信号が形成する情報空間において、心的事象の質や量がどのように表現されているかはもちろん不明だが、デコードにおいては、真の情報空間が取得される信号のデータ空間へ投射されていると考えればよいはずだ。

まずは、デコードをカテゴリーカルに行うとして、それ

がデータにつけられたラベルによって表現されているでしょう。空間次元の次数が高くなればなるほど、データをラベルに応じて区分するための条件を明示的に記述するのは困難になり、ヒトの直感や計算能力ではおおよそ不可能となることは容易に想像ができる。デコードを実現する方略の数学的モデルの一つは、データのための多次元空間があり、その空間がラベルのついた複数の領域に分割されていて、あるデータ点がどの領域に属しているかをラベル名で答えるというもので、デコードの構築を、データ点を表現するための多次元空間の生成と、ラベルに対応する領域を分割するための境界面の確立とに還元することに等しい。先のステップ1で取り上げた量的な側面についても、上述の原理でデコードが可能である。例えば、データ点の領域境界からの距離、もしくはデータ領域内の基準点からの距離によって量をデコードすることと考えることができる。後者の基準点の考え方は、概念形成におけるプロトタイプの考え方に符合する。

fMRI や脳波の計測などを用いた研究においては、複数回の測定結果を加算することでノイズの相殺を行って本質的な部分を描き出したり、異なる条件との差分を取って必要な部分を描き出したりすることが一般的である。しかし、上述のような方法は、相殺や差分などを用いる古典的な方法とは異なっている。複数のデータの共通性を抽出することによって、本質的な部分を描き出すとするものである。

時間の扱いについては多様な方法が可能である。単純には、各測定点における時間的変調を無視してしまい、個々のサンプリング時点を独立な次元とみなしてデータを表現する空間を構成することができる。当然、時間的変調に情報が含まれるときには、これを検出することができなくなる可能性が生じる。こうした情報を維持し続けるデータ表現空間を構成しようとするならば、時間を独立な次元として設定し、各測定位置における時系列データを時間軸に沿った曲線として表現するという方法を考えることができる。点群による領域判別と異なり、曲線群によって領域判別を行う必要が生じるため、演算は複雑にならざるを得ない。より詳細に時間変調を取り扱おうとするならば、データの時間微分も二次データとして判別に使用することが必要になる。情報を詳細なままにしようとするれば、自ずと演算の負荷が増えていくことになる。

空間次元の次数が高くなればなるほど、また領域の数が多くなればなるほど、境界を定める演算は重労働にな

る。空間が2次元か3次元で、境界が2次元直線か3次元平面といった線形境界であるのであれば、ヒトの手でも発見できるかもしれないが、遙かに高次になったり、境界が非線形曲面になったりしているのであれば、この演算は人の手に負えない。つまり機械に頼るしかない。このときに利用されるのが機械学習アルゴリズムと呼ばれるものである。上で述べた数学的モデルの考え方に沿って実現しようとするのであれば、例えば Kamitani and Tong (2005) が用いたようにサポート・ベクター・マシンを利用することが一つの方法となる。明示的な数学的モデルが不要であれば、神経系のモデルでもあるニューラル・ネットワーク・モデルによって実現することも可能かもしれない。

当然のことながら、機械学習アルゴリズムが万能ではないことに留意する必要がある。大容量の信号データを扱おうとすれば、それは遥か高次の空間での判別を要求することになり、ラベルの数が増えることも相まってしまうと、デコードするための数学的モデルを構築するための演算処理が膨大なものとなり、アルゴリズムによってはノイズに対して非常に脆弱なモデルしか構築できない、もしくは有効なモデルが全く構築できないということになりかねない。この点でステップ1の項で述べた小容量のデータによってデコード可能であるという事実は、ブレイン・デコーディングを実現する上で非常に有意義なのである。

あるいは、測定された信号データ空間の次数が高くて、当該の領域区分のために必要なデータの次元はそのうちの一部で済む場合が考えられる。そもそも、必要な情報がいつどこにあるのかは未知なのである。仮に可能な限りあらゆる脳活動信号を取得し、デコードを実現するデータ次元が特定されたとしてみよう。それぞれのデータの次元が一群の（または単一の）脳の神経細胞の活動によって規定されていると仮定すれば、デコードに必要な次元を規定する神経細胞には当該の心的事象の内容と強い関係性をもっているものが含まれており、これ以外の神経細胞は当該の心的事象の内容とは無関係である可能性が高いということが推測される。このことから、できるだけ多くの脳活動情報を取得し、そのなかで最低限の次数空間でのデコードが実現されれば、デコードにおける演算が簡略化されるだけでなく、心的事象と神経細胞との関連性についてもより直感的な示唆を得ることができる。もちろん、情報の多重性や冗長性の問題があるので、当該の心的事象がそれらの神経細胞によって担われていると断定することはできない。し

かしながら、ある種の心的事象のデコードをそのほかの要因のアーチファクトではない形で実現できるのであれば（例えば、特定の知覚的刺激や状況に依存しないような怒りという感情状態をデコードすることのできる神経活動信号のデータ空間を特定する）、心的事象の脳領域の座とその神経コーディングとについて、かなり「近く」にまで迫ることになると考えてもよいのではないだろうか。

ステップ3 デコーダ評価

ステップ3は、デコーダ評価である。一般には、デコードすべき内容が既知である脳活動信号のうち、デコーダの作成には使用されていないものを用いて、この信号から正しくデコードできることを示すことによって、デコーダの性能を保証することになる。

評価だけにとどまらず、ここには大きな発展の可能性がある。今、複数種類のデコーダがデータ空間の領域分割によって構築されていると仮定しよう。それぞれのデコーダが用いているデータ空間を比較し、次元の対応を行う。対応する次元と非対応次元とを勘案して空間を拡張し、上位の高次空間を形成する。こうすれば、理論的には、拡張した空間で定義されるデータに対して、すべてのデコーダの振る舞いが維持されるはずである。それぞれのデコーダが用いている空間領域を比較したときに、交わりが存在していれば、この領域に入るデータに対するデコードは、それぞれの領域に対応する心的事象の交わりとなるはずである。このようにして、同時生起している複雑な心的事象のコードをデコードできるように、デコーダを発展させていくことが可能になるかもしれない。次に、データ空間内にデコーダが定義されていない領域が存在していると仮定してみよう。例えば、デコーダが用いている領域が閉じている場合などを考えてみればよい。このような領域の生成は、デコーダを構築するときの学習アルゴリズムによって規定されるから（演算が複雑になり、解を求めることができるかどうかはわからないが）、不可能ではない。また、ある種の心的事象に対応する脳活動信号データが、データ空間内にどのように分布するかは自明ではなく、ある限定空間領域に集中することを否定する根拠もない。従って、こうした仮定に基づいた考察を行うことには何ら不合理はないと考えられる。さて、デコーダが用いていない領域では、デコードすべき心的事象が定められていない。この領域に入るデータに対してデコードすべき心的事象を、既知のデコーダが用いている領域から演繹的に推測する

ことはできないであろうか。もしこれが可能であれば、未学習の心的事象をデコードすることができるようになることを意味する。これはデータによって構築したデコードのための空間が、心的事象を表現する空間として妥当かつ有効なものであることの証拠の一つといえるだろう。

ブレイン・デコーディングによって、さまざまな心的事象について徐々にデコーダが構築されて蓄積されていくことは期待できるとしても、すべての心像が尽くされるとは考えにくい。既存のデコーダによる未学習の心的事象の予測が、心の理解にとって非常に有益であることは想像にたやすい。そして、コードの変移を心的事象の変移を産み出すプロセスとみなせば、前述のようなデコーダの拡張は、心的事象の拡張過程のシュミレーションとして理解することができる。未経験の脳活動が生起したときの新たな心的事象の生成と考えることが許されれば、心の発達モデルにも適用できることになる。

さらに極論してみよう。ニューラル・ネットワーク・モデルではなく、明示的な数学モデルでデコーダが実現されたとすれば、心的事象が数学的にモデル化されたことを意味する。このことの心理学的意義は計り知れない。

繰り返しになるが、ブレイン・デコーディングの成功は、心的事象の生起メカニズムの証明とはならない。仮に心的事象をデコードすることができる神経細胞（群であれ単一であれ）が特定されたとしても、相関関係があるという事実が明らかになったに過ぎず、因果が示されていないからである。たとえ脳活動と心的事象との詳細な時間関係が特定されて、脳活動の時間的な先行性が確認されたとしても、やはり妥当性が増すだけであって因果律の証明とはならない。因果関係については、領域と機能について二重乖離が確認できれば強い証拠になるが、ヒトの場合の神経細胞を直接刺激する実験は、現在の所、経頭蓋磁気刺激法 (Transcranial Magnetic Stimulation, TMS) といった方法に頼る以外はないが、この方法は空間精度的にはまだ十分なものとはいえない。

ブレイン・マシン・インターフェース

次に、ブレイン・マシン・インターフェース (Brain-Machine Interface) について考えてみよう。ブレイン・マシン・インターフェースとは、その語のとおり、脳と機械をつなぐしくみのことである。実際には、脳が力学的機構に直結されることはほとんどなく、電子的な制御装置とつながれることが多いので、ブレイン・コンピ

ュータ・インターフェース (Brain-Computer Interface) と呼ばれることがあり、二つの語はほとんど同義のように用いられている。ブレイン・マシン・インターフェースは二つに大別可能で、一つは脳神経の出力信号によって機械の動作を制御するもの、もう一つは機械からの信号を脳神経に直接入力するものである。臨床応用的には、前者は人工運動器が、後者は人工感覚器が想起されやすい。ブレイン・マシン・インターフェースの臨床応用的意義の詳細については他の論文に譲り、本稿ではブレイン・デコーディングとの関係からその心理学的意義について検討したい。

ブレイン・マシン・インターフェースにおいては、厳密な意味でのブレイン・デコーディングは必ずしも必要ではない。先の人工運動器の制御に関していえば、ヒトが作り出す信号が弁別可能でありさえすれば実用可能になるからである。例えば、Choi and Cichocki (2008) が示しているように、車椅子の制御のためのインターフェースであっても、必ずしも車椅子に関係するような心像を生成する必要はない。彼らは、左右の手や足の特定の動きを想起させた際に感覚運動野から異なる脳波信号を抽出できることを利用して、車椅子をリアルタイムで制御できることを示している。制御精度を上げるためには、より弁別性の高い信号を制御に用いればよい。極端な例を作るならば、右旋回のための制御には帽子の絵の想起、左旋回のための制御には暗算といった恣意的な認知課題を設定することによって信号の弁別性を高めて、制御の正確精度を上げることができる。このような極端すぎる恣意性は、実際の制御場面においては不自然さを伴い、また事前の訓練も必要となる。こうした事態はブレイン・デコーディングによって解消できる可能性がある。四肢を制御している脳の運動野からの信号を取得し、デコードしてから四肢を模した機械の制御に用いるのであれば、生体側での事前の訓練はほとんど必要ではなくなる。これは究極の「自然な」インターフェースとすることができる (Poslad, 2009)。

具体的な例を考えてみよう。「機器が動作している様子を想起する」だけでその機器が想起したとおりに動作するのであれば、まさに「思ったとおりに動く (動かす)」ことが実現したことになる。「機器の動作の想起」が脳のどこで担われるかは未詳であるが、自分自身のアバター (化身) の動作であれば、視覚野と運動野が可能性の高そうな脳領域の候補となるだろう。実空間もしくは仮想空間内のアバターが自分の想起する身体運動イメージどおりに動いてしまったら、心理的にはいったい

どのようなことが起こるのだろうか。Friedman et al. (2007) は、仮想 (バーチャル) 空間内のアバターが参加者の歩行運動のイメージ想起時の脳波信号によって歩行する様子を作り出した。このとき参加者は、自分のイメージ想起によって画像が動くということを知らされていなかった。また、ブレイン・デコーディングは完全なものではなく、時間遅れも誤りも生じていた。であるにもかかわらず、個人差があるものの、参加者によってはアバターに自己を投影して自己同一化を起こしてしまう例があるということを彼らは報告している。視覚以外の感覚的フィードバックがなくても、また不完全なブレイン・デコーディングであっても、アバターの身体画像を自己身体 (あるいはその投影) であると感じることができるということは、非常に興味深い。ブレイン・マシン・インターフェースは、現実世界と仮想世界のいずれにおいても拡張身体をもたらすことができる。このような拡張身体の知覚においては、必ずしも完全な感覚情報の入力が必要ではないと考えられる。Botvinick and Cohen (1998) が報告した「ラバー・ハンド・イリュージョン」という現象にあるように、視覚情報によって触覚が生じたり、自己身体的位置感覚が視覚情報によって歪められたりすることが知られているからである。

ここで、脳波 (electroencephalogram, EEG) のブレイン・マシン・インターフェースでの利用について検討しておこう。脳波信号は、ほかの脳活動測定方法と比較して、時間解像度が高いといえる。電気的な変化を単純に測定するので、ミリ秒オーダーの分解能を有している。一方、測定している電気的な変化の原因となっている神経細胞の位置情報との対照という観点から考えると、空間解像度は極めて低い。頭蓋骨や皮膚などの電気的な伝播の影響によって、そもそも一つの電極が測定している電気信号は多くの神経細胞の興奮の時空間加算になっており、電極による測定位置と原因となる神経細胞の位置の対照性はないに等しいからである。可能性としては、頭蓋骨や皮膚の電気的伝播の時空間特性を考慮して、さまざまな測定位置における測定を比較することで時空間パターンを解析すれば、ある信号の脳内における発生位置を推定することも考えられる。実際、そのような推定方法が検討されており、その精度も上がっていくことが期待されている。しかしながら、現時点では脳波の空間解像度は低いといわざるを得ない。こうした空間解像度の低さにもかかわらず、ブレイン・マシン・インターフェースにおいて脳波信号が用いられることが多いのは、時間解像度が高いことによって、制御のための時

間遅れを減らすことができるという原理的利点と、装着する測定機器によるヒトの行動の制限が比較的軽微であるという応用的利点、また測定機器自体が比較的低価格で実現可能であるという経済的利点があるからである。また、左右のいずれかを選択するといった比較的単純な機械制御であれば、大脳半球のラテラルリティを利用するなどによって、空間解像度が低いという問題を回避することも可能であるという点も、脳波が用いられる大きな要因となる。

これまでのブレイン・マシン・インターフェースの研究は、どちらかといえば臨床的応用が可能であるかという観点からの技術的実現に重きが置かれている（長谷川, 2008）。ブレイン・デコーディングとブレイン・マシン・インターフェースを組み合わせることによって、どのような心理学的な研究の発展が期待できるのかを垣間見たい。

Takai et al. (2011) は、ブレイン・デコーディングによって、傾き運動のイメージを想起した時の脳波信号からその傾き5方向をデコードすることが可能であることを示した。傾き運動の想起は、アバターのような拡張身体における姿勢制御という事態においては極めて自然なインターフェースである。この制御事態において、身体にかかわる感覚の様相を調べることにより身体性という観点から自己意識や現実感を研究することが可能になるだろう。また、身体の傾きを想起することで乗物の方向制御を行うという事態を設定すれば、二輪車での走行を思い起こしてもらえばわかるように、これも自然な状況であるから、身体の傾き運動想起は乗物の制御においても自然なインターフェースということになるだろう。さらには、これによって乗物自体を拡張身体と知覚してしまうことさえあるかもしれない。ともかくも、このように、傾き運動の想起をデコードし、これを制御信号として使うことで、広い意味での身体の拡張を実現でき、生体への知覚的影響について調べることが可能になるのである。さらに彼らは、デコードのための信号を生成する際にフィードバック訓練を行い、これがイメージ想起においてどのような意味を持つのかについても調べようとしている。自然なインターフェースを実現することのできる自然な脳活動信号なのだから、訓練は必ずしも要しないはずであるが、ブレイン・マシン・インターフェースの実現においては、制御者の想起の訓練が非常に有効であることが経験的に知られており、また実際に皮質における活動の変化も確認されている（Bauernfeind, 2011）。説明の可能性として、雑念の排除によ

る他過程の抑制によるノイズの減少、意識的集中による信号の増強などを考えることができる。しかし、これらが心的事象として正しいかは確認されていない。このときの訓練によって、何がどのように変化したのかが明らかになれば、スポーツなどのイメージトレーニングに対しても示唆を与えることができるだろう。

さらに憶測を加えてみよう。自己の運動的分身であるアバターに人工感覚器を装着し、通常感覚情報へとエンコードして、ブレイン・マシン・インターフェースによって感覚神経系に入力する。これは、もう一つの「リアルな」身体を形成したことにほかならない。これが実現すれば、自己身体の二重性における自己意識を検討することができる。また、身体を伴う感覚運動系を新たに備えることによって、脳活動状態と身体とに新たな結合を形成することもできるはずである。つまり、脳活動状態に身体的な意味を付与することも可能である。これは、変換視研究などで視覚と運動の再体制化の現象から視覚系と運動系の協調的システムの様相を解明しようとする（例えば、吉村, 1984; Imamizu & Shimojo, 1995 など）のと同様に、感覚—運動—身体にかかわる心的機能を再構築することが可能になったことによって、心的機能全般についての構築機序についての知見が得られることになる。さらには、例えば赤い帽子は右への方向転換で青い帽子が左への方向転換というように、（脳活動を伴う）既存の概念と身体の運動性との新たな恣意的な連合を形成することで、概念の意味を身体性の下で操作し、概念形成についても検討することができるようになる。もちろんこうした実験は倫理的に極めて困難なものであり、空想の域を出るものではない。しかしながら、ブレイン・デコーディングによって脳のシミュレーションモデルが完成すれば、心の形成にアプローチできるようになるということは強調しておきたい。

最後に

ブレイン・マシン・インターフェースは臨床的応用を先駆けとしてその精緻化と実用化が進んでいる途上であり、マインド・リーディングの意味でのブレイン・デコーディングはその端緒についたばかりである。いずれの方法も、それだけで万能の証明能力が発現するわけではない。両者を心の研究の道具として同時に採用することによって、心的機能の解明に新たな局面がもたらされることは疑いようもない。

マインド・リーディングという概念に対する倫理的懸念から、ブレイン・デコーディングの方法を用いること

に疑義をはさむ見方も生じるかもしれない。現時点では、参加に同意し脳活動の計測を行ったとしても特定個人の自由な思考内容を推定することはできない。また、思考内容を推定することができるほどの詳細な測定を、同意しない本人に気がつかれることなく行うことができるようになるのもまだ当分先のことである。太古の昔から、顔の表情や仕草などから相手の思考を読み取ろうとする試みは日常的になされてきた。また学問的にも挑戦はし続けられている。こうしたことが科学技術によって実現してしまったとしても、倫理や道徳の変化は必要になるだろうが、ある意味では必然ということができるのではないだろうか。いずれにしろ今のところは、こうした技術や方法を駆使して心的機能のさらなる解明がはかれることが期待される。

謝辞

本稿は平成22年度専修大学長期在外研究員としての研究成果の一部である。

引用文献

- Bauernfeinda, G., Kaisera, V., Kaufmannb, T., Kreilingera, A., Kublerb, A., & Neuper C. (2011). Cortical effects of BCI training measured with fNIRS. *International Journal of Bioelectromagnetism*, **13**, 66–67.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, **391**, 756.
- Choi, K., & Cichocki, A. (2008). Control a Wheelchair by motor imagery in real time. *Lecture Notes in Computer Science, Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. Springer. pp. 330–337.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support–Vector Networks. (1995). *Machine Learning*, **20**, 273–297.
- Friedman, D., Leeb, R., Dikovsky, L., Reiner, M., Pfurtscheller, G., & Slater, M. (2007). Controlling a virtual body by thought in a highly-immersive virtual environment. *GRAPP 2007*, 83–90, *International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, 2007.
- 長谷川良平 (2008). ブレインマシンインターフェースの現状と将来 電子情報通信学会誌, **91**, 1066–1075.
- Imamizu, H., & Shimojo, S. (1995). The locus of visual–motor learning at the task or manipulator level : implications from intermanual transfer. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **21**, 719–733.
- 神谷之康 (2007). 脳から心を読む方法 ブレイン・デコーディング, 「脳を活かす」研究会編 pp.2–22.
- Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. *Nature Neuroscience*, **8**, 679–685.
- Miyawaki, Y., Uchida, H., Yamashita, O., Sato, M., Morito, Y., Tanabe, H., Sadato, N., & Kamitani, Y. (2008). Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders. *Neuron*, **60**, 915–929.
- Poslad, S. (2009). *Ubiquitous Computing : Smart Devices, Environments and Interactions*. Wiley.
- Takai, Y., Nakazawa, H., Kato, M., Kamatani, Y., & Kitazaki, M. (2011). Neural decoding of 5 leaning directions in motor imagery from event-related potentials. *17 th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping 2011*.
- 吉村浩一 (1984). 変換視研究をめぐる理論的問題I：逆転視・反転視に関する用語と内観報告法について 金沢大学文学部論集 行動科学科篇, **4**, 27–40.